

## МАШИНОЗНАВСТВО. ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.375

А.В. Бєлова,

Національний технічний університет України "КПІ"

### КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТІ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ЛІНІЙНИХ ПРЕЦИЗІЙНИХ НАПРАВЛЯЮЧИХ

*(Представлено д.т.н., проф. Антонюком В.С.)*

*Дана робота присвячена розробці методики вимірювання лінійних переміщень вздовж осі переміщення лінійних прецизійних направляючих мікрomanipуляторів для клітинних мікротехнологій. Для вимірювання таких переміщень лінійних направляючих використовували систему на основі мікроскопу, спряженого з телевізійною камерою. Дані з мікроскопа зчитуються телевізійною камерою і передаються для обробки в комп'ютер за допомогою спеціального технічного та програмного забезпечення. Аналізуючи телевізійне зображення об'єкта, отримали дані про його лінійні розміри, а також точність переміщення. При цьому контролювали два параметри: гістерезис та мертвий хід, який обумовлений наявністю люфтів в системі мікрогвинт-мікрогайка. Так, для лінійних направляючих класу Precision 4" Screw-Travel мертвий хід і гістерезис становлять 9–11 мкм, а класу направляючих Sb-01 – 1–2 мкм.*

**Вступ.** Основними задачами сучасного точного приладобудування є задачі розробки та побудови високоточних пристроїв формування та керування рухом у мікропросторі, з одночасним підвищенням точності деталей, які входять до їх складу. Сучасні технічні вимоги до засобів вимірювання в приладобудуванні постійно зростають, особливо це стосується прецизійних приладів та високоточних систем, що мають виконавчі елементи для лазерних технологій, фотолітографії, медичних мікротехнологій тощо. Одним з перспективних напрямків сучасних медичних технологій є клітинні мікротехнології.

Розвиток таких технологій неможливий без спеціальних приладів – мікрomanipуляторів. Це особливий клас дуже складних приладів, які разом з мікроскопом дозволяють маніпулювати мікрооб'єктами в мікронних та субмікронних діапазонах, здійснювати мікрооперації на клітинному рівні, технології зі штучного запліднення тощо. Мікрomanipулятори входять до складу найновіших сучасних медико-біологічних роботів та можуть широко застосовуватись в інших областях, наприклад, в електронній промисловості, хімічній тощо [1]. До складу мікрomanipулятора обов'язково входять направляючі, які є основними виконавчими елементами і мають безпосередній контакт з клітиною через піпетку чи голку.

Для проведення клітинних мікрооперацій застосовується спеціальне обладнання – мікрomanipуляційний комплекс, до складу якого входять мікрomanipулятори різних типів [3]. Такі мікрomanipулятори повинні поєднувати в собі дуже специфічні та складні характеристики, до яких відносяться: практична відсутність дрейфу; плавна зміна швидкості в широкому діапазоні; можливість формування програмованого руху у мікроскопі; можливість формування аксіального руху під будь-яким кутом; можливість формування програмованого удару для проколювання мембрани клітини [4]. Цим самим жорсткі вимоги пред'являються і до безпосередньо направляючої та точності її переміщення.

Направляючі використовуються в малих вимірювальних мікроскопах, які призначені для вимірювання мікроскопічних деталей, для швидкісного точного оптичного фокусування, окрім того кулькові лінійні направляючі використовуються для переміщення предметного столика, на якому знаходиться дослідний зразок. Вони відповідають за плавне переміщення різноманітних сенсорів з мінімізацією вібрацій та варіацій швидкостей. Всі вони вносять свій вклад функціонування таких систем в процесі виконання цих мікроскопічних переміщень. Оскільки вимірювальна головка чи носик голки або піпетки далеко виступають за систему направляючих, навіть невеликі її зміщення та відхилення можуть сильно вплинути на точність переміщення робочого органу [2].

В процесі руху направляюча здійснює переміщення, до складу якого входять як лінійні вздовж осі переміщення, так і кутові переміщення в діапазоні кутових секунд. Таким чином, критичні вимоги пред'являються в першу чергу до лінійних переміщень. Тобто необхідність контролю лінійних переміщень вздовж осі переміщення є основною задачею, яка є досить актуальною в умовах розвитку сучасної науки.

Тому створення високоточних прецизійних лінійних направляючих є життєво необхідними для реалізації технологій та проведення різноманітних мікрооперацій.

Таким чином розробка нових методик та засобів для вимірювання і контролю точності переміщень, які повинні забезпечувати нові високоточні пристрої, є дуже складною і актуальною задачею.

**Постановка задачі.** Робота присвячена розробці методики вимірювання переміщень лінійних прецизійних направляючих мікроманіпуляторів з п'єзоелектричним двигуном для проведення мікрооперацій на клітинному рівні.

#### Комплекс для вимірювання переміщень лінійної направляючої.

Проведення мікрооперацій на клітинному рівні вимагає використання спеціального обладнання – мікроманіпуляційних комплексів, до складу яких входять направляючі різних типів. Точність переміщення лінійних прецизійних направляючих суттєво впливає на якість проведення мікрооперацій, оскільки навіть невеликі відхилення від прямолінійності впливають на точність переміщення робочого органу.

Для вимірювання лінійних переміщень лінійних направляючих мікроманіпуляторів використовували вимірювальний комплекс на основі мікроскопа, спряженого з телевізійною камерою (рис. 1). Експериментальні дослідження проводили для направляючих з п'єзоелектричним двигуном типу Precision 4" Screw-Travel (Edmund Optics Inc.) та Sb-01 в трьох положеннях рухливого столика: на краях та всередині.



Рис. 1. Структурна схема вимірювального комплексу для вимірювання лінійних переміщень направляючих з п'єзоелектричним двигуном

Дані з мікроскопа зчитуються телевізійною камерою і передаються для обробки в комп'ютер за допомогою спеціального технічного та програмного забезпечення і виводяться на монітор комп'ютера, що значно полегшує роботу з мікроскопом та виключає виникнення суб'єктивних похибок.

Аналізуючи телевізійне зображення об'єкта, можна отримати відомості про його лінійні розміри, а також спостерігати за його переміщенням і разом з тим контролювати точність цього переміщення. Як такий об'єкт використовували скляну голку, виготовлену спеціальним чином, діаметр якої не перевищував 3 мкм. Схема вимірювального комплексу для вимірювання лінійних переміщень направляючої та його загальний вигляд наведено на рис. 2.

Установка складається з закріпленого на штативі тримача 3 мікроскопа 1, спряженого з телевізійною камерою 2. На столику тримача жорстко закріплена лінійна прецизійна направляюча 4 таким чином, що в тримачі 5 нерухомо відносно столика зажатий рухливий столик 6 направляючої, при цьому переміщення здійснює корпус 7 направляючої. Скляна голка 8 жорстко закріплювалась на корпусі направляючої 7 за допомогою тримача 9 таким чином, що повністю повторювала рухи направляючої. На столику також розміщена освітлювальна система 10, яка представляє собою лампу та забезпечує рівномірне і достатнє освітлення препарату.

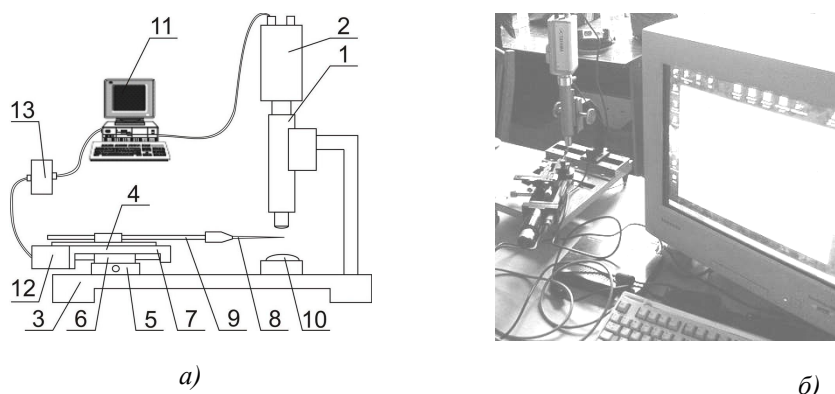


Рис. 2. Схема вимірювального комплексу для вимірювання лінійних переміщень (а) та його загальний вигляд (б); 1 – мікроскоп; 2 – телевізійна камера;

3 – тримач; 4 – лінійна прецизійна направляюча; 5 – тримач; 6 – рухливий столик;  
7 – корпус направляючої; 8 – скляна голка; 9 – тримач; 10 – освітлювальна система;  
11 – екран монітора; 12 – п'єзоелектричний двигун лінійної направляючої з датчиком лінійного руху;  
13 – контролер

Телевізійна камера з'єднана з відеокартою комп'ютера, яка виконує захват та обробку відео, а також передає його на екран 11 через спеціальне програмне забезпечення.

П'єзоелектричний двигун лінійної направляючої разом з датчиком лінійного руху 12 з'єднаний з контролером 13, який, в свою чергу, через порт USB 2.0 з'єднується з комп'ютером. Таким чином, за допомогою тієї ж програми виконується керування рухом направляючої.

В процесі руху направляюча здійснює лінійні переміщення вздовж осі переміщення. Датчик лінійного руху задає діапазон переміщень, але при цьому не фіксує реального переміщення безпосередньо направляючої. Таким чином, реальні переміщення можуть дещо відрізнятись від заданих через вплив таких негативних факторів, як гістерезис та мертвий хід, що обумовлені наявністю люфтів в системі мікрогвинт-мікрогайка.

При цьому гістерезис зустрічається при зворотному напрямку та впливає на похибку позиціонування шляхом послаблення еластичних сил в з'єднувальних компонентах і є не постійним через різницю величин навантажень та прискорень.

Мертвий хід (відсутність руху після зворотного напрямку) може бути викликаний коливанням в посадці гвинт/гайка, зубчастому редукторі, підшипниках тощо.

При вимірюванні лінійних переміщень основну увагу зосереджували на параметрах – гістерезисі і мертвому ході. Для проведення таких вимірювань розроблена програма, яка задавала циклічний рух направляючої в позитивному та негативному напрямках на певну відстань, тобто почергове виконання позитивного і негативного реверса. Таким чином, в першому випадку, вимірювали мертвий хід направляючої при позитивному реверсі (зміні напрямку руху направляючої), в другому випадку – при негативному реверсі. При цьому фіксували проміжні точки положення голки для отримання форми петлі гістерезису.

**Оцінка роздільної здатності вимірювальної установки.** Для вимірювання переміщення направляючої необхідно визначити основні характеристики мікроскопа, спряженого з телевізійною камерою, до яких відносяться роздільна здатність та ефективне лінійне збільшення. При цьому роздільна здатність формується з оптичної роздільної здатності та електронної.

Роздільна здатність об'єктиву  $d$  визначається співвідношенням:

$$d = \frac{0,61 \cdot \lambda}{n \cdot \sin \alpha}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі світла, яке використовується для освітлення об'єкта;  $n \cdot \sin \alpha$  – нумерична апертура об'єкта.

Вимірювання проводилися при видимому білому світлі з середньою довжиною хвилі 0,53 мкм, тобто  $\lambda = 0,53$  мкм, нумерична апертура – 0,4 ( $n \cdot \sin \alpha = 0,4$ ). Оптична роздільна здатність мікроскопа, який застосовується для вимірювань, дорівнює  $d = 0,8$  мкм.

Вимірювальний комплекс на основі мікроскопа, спряженого з телевізійною камерою, побудований за схемою об'єктив-тубус-телевізійна камера. В такому випадку зображення від об'єктиву проектується безпосередньо на ПЗЗ-матрицю телевізійної камери.

Електронна роздільна здатність визначається за формулою:

$$d_e = \frac{L}{\Gamma}, \quad (2)$$

де  $L$  – характерний розмір пікселя ПЗЗ-матриці;  $\Gamma$  – оптичне збільшення об'єктиву.

В комплексі використовували камеру TAYAMA 1/3". Таким чином, розмір ПЗЗ-матриці камери – 3,6x4,8 мм, піксельна розмірність – 480x640. Отже, характерний розмір пікселя матриці  $L = 7,5$  мкм.

Оптичне збільшення  $\Gamma$  мікроскопа даної установки дорівнює 20, тому, за формулою (2), електронна роздільна здатність дорівнює  $d_e = 0,375$  (мкм). Таким чином, роздільна здатність мікроскопа, спряженого з телевізійною камерою, дорівнює 0,8 мкм.

Оскільки при використанні телевізійної камери зображення отримується на моніторі комп'ютера, необхідно визначити такий параметр, як ефективне лінійне збільшення ( $\Gamma_{MT}$ ). Воно визначається як добуток збільшення світлового мікроскопа ( $\Gamma_0$ ) та електронного збільшення (масштабування)  $\Gamma_M$ :

$$\Gamma_{MT} = \Gamma_0 \cdot \Gamma_M, \quad (3)$$

де масштабування  $\Gamma_M = \frac{D_e}{D_m}$  – це відношення діагоналі екрана ( $D_e$ ) монітора до діагоналі ПЗЗ-матриці ( $D_m$ ),

Збільшення мікроскопа з телевізійною камерою можна визначити як відношення розміру зображення предмета на екрані монітора збільшення світлового мікроскопа  $L_M$  (мм) до розміру самого предмета  $L_{II}$  (мм):

$$\Gamma_{MT} = \frac{L_M}{L_{II}}. \tag{4}$$

Ефективне лінійне збільшення мікроскопа, спряженого з телевізійною камерою, дорівнює  $\Gamma_{MT} = 988,3$ .

**Вимірювання лінійних переміщень направляючої типу Precision 4" Screw-Travel.** Лінійна направляюча типу Precision 4" Screw-Travel складається з двигуна, рухливого столика, корпусу та направляючого гвинта. В основу направляючої покладений принцип тонких поступових переміщень гайки при обертанні гвинта. Різь у гвинті такої направляючої має крок 1 мм, тобто при здійсненні одного оберту гвинта рухливий столик направляючої виконає лінійне переміщення на відстань 1 мм.

Схема направляючої з п'єзоелектричним двигуном Precision 4" Screw-Travel та її загальний вигляд зображено на рис. 3.

Рухливий столик 1 закріплений через гайку 2 на гвинті 3. Направляючий гвинт 3 кріпиться в корпусі такої направляючої жорстко за допомогою шарикопідшипників 4 і 5, окрім того він жорстко зв'язаний з валом 7 двигуна 6. При обертанні вала двигуна 7 гвинт 3 також обертається, таким чином рухливий столик 1 здійснюватиме лінійні переміщення за рахунок системи гвинт/гайка.

В результаті проведених вимірювань встановлено, що направляюча типу Precision 4" Screw-Travel не може забезпечити високої точності лінійних переміщень. Так, мертвий хід (повернення направляючої в початкове положення при реверсі) такої направляючої дорівнює від 8 до 2 мкм, в залежності від положення рухливого столика на гвинті. При цьому мертвий хід змінюється випадковим чином, що можна пов'язати з неточністю виконаної різі на гвинті або гайці.

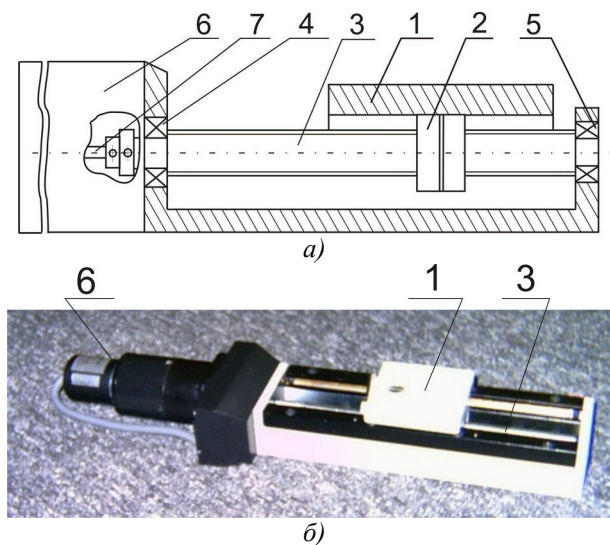


Рис. 3. Спрощена конструкція лінійної направляючої з п'єзоелектричним двигуном Precision 4" Screw-Travel:

1 – рухливий столик; 2 – гайка; 3 – гвинт; 4, 5 – шарикопідшипники; 6 – двигун;  
7 – вал двигуна

Для дослідження наявності гістерезису при переміщенні направляючої фіксували положення голки в різні моменти переміщення при позитивному та негативному реверсі.

Петлю гістерезису в даному випадку можна охарактеризувати двома параметрами – ширина гістерезису та кут гістерезису. На рис. 4 зображена петля гістерезису такої направляючої.

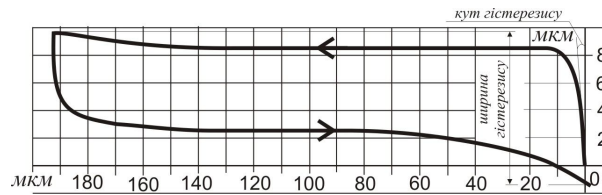


Рис. 4. Петля гістерезису направляючої типу Precision 4" Screw-Travel

Як видно з рисунка, ширина гістерезису направляючої складає 11,1 мкм, а кут наближається до 90°, це означає, що відбувається різке перпендикулярне зміщення інструменту при його реверсі. Причиною такого випадку може бути боковий люфт або значні кутові захили, які виникають в системі під час лінійного переміщення [6]. Як правило, цими кутовими захилами нехтують, зважаючи на їх величини порядку кутових секунд.

**Вимірювання лінійних переміщень прецизійних лінійних п'єзоелектричних направляючих типу Sb-01.** Лінійна прецизійна направляюча мікроманіпулятора для клітинних технологій типу Sb-01 представляє собою кулькову направляючу, до складу якої входять такі основні вузли, як п'єзоелектричний двигун, рухливий столик, корпус та направляючий вал [5]. Принцип роботи п'єзоелектричної лінійної направляючої оснований на перетворення обертового руху п'єзоелектричного мотору в поступальний рух рухливого столика за допомогою прецизійного гвинта-гайки. Різь в мікрометричному гвинті має крок 500 мкм, тобто при повороті гвинта за допомогою двигуна на 4...5 кутових секунд можна досягти поступального переміщення, а отже і роздільної здатності на рівні 0,002 мкм. Діапазон лінійного переміщення такої направляючої складає 10 мм. Схема лінійної прецизійної направляючої з п'єзоелектричним двигуном типу Sb-01 та її загальний вигляд зображено на рис. 5.

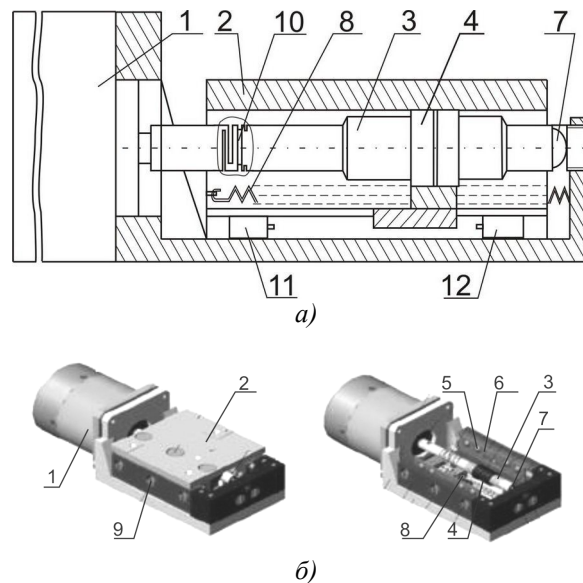


Рис. 5. Схема лінійної прецизійної направляючої з п'єзоелектричним двигуном типу Sb-01 (а) та її загальний вигляд (б):

- 1 – п'єзоелектричний двигун; 2 – рухливий столик; 3 – прецизійний гвинт; 4 – прецизійна гайка; 5 – кульки; 6 – сепаратор; 7 – упорна кулька; 8 – прижимні люфтовибірні пружини; 9 – люфтовибірний гвинт; 10 – кардан; 11, 12 – система автоматичного відключення двигуна

На відміну від направляючої типу Precision 4" Screw-Travel (рис. 3) направляюча типу Sb-01 має складнішу конструкцію. До її складу входять такі додаткові складові, як люфтовибірний гвинт 9, прижимні люфтовибірні пружини 8, які призначені для зменшення люфтів у системі. Окрім того, мікрогвинт виконаний та встановлений в корпус направляючої таким чином, щоб компенсувати кутові та лінійні неспіввідності гвинта та вала двигуна за допомогою кардана 10 та упорної кульки 7. В даній направляючій змонтована спеціальна система автоматичного відключення двигуна в крайніх положеннях, яка виконується мікроперемикачами.

Вимірювання переміщень направляючих типу Sb-01 показали, що мертвий хід складає від 1 до 3 мкм для різних направляючих та їх положень. При цьому виявлено, що найменший мертвий хід для кожної направляючої спостерігається при її середньому положенні. На краях його величина дещо збільшується.

При вимірюванні гістерезису різних направляючих з п'єзоелектричним двигуном типу Sb-01 виявлено, що він має схожі параметри, але вигляд петлі трохи відрізняється. На рис. 6 зображені три типи петлі гістерезису направляючих з п'єзоелектричним двигуном типу Sb-01.

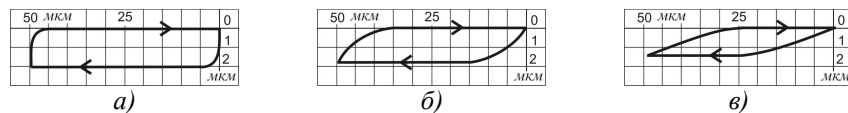


Рис. 6. Петлі гістерезису для різних направляючих типу Sb-01

Як показав аналіз петель гістерезису, їх ширина для всіх направляючих майже однакова і дорівнює 1–2 мкм, а кут гістерезису відрізняється. При цьому петля гістерезису може мати прямокутну форму (рис. 6, а). Це найбільш небажаний випадок у направляючої, тому що кут дорівнює майже 90°. Реалізація такої ситуації при мікрооперації з живою клітиною може привести до значних її пошкоджень.

Випадок, коли петля гістерезису (рис. 6, б) наближається до паралелограма, є не настільки критичною, як у першому випадку. Такі кути в петлі гістерезису можливо пов'язані з додатковими пружними компонентами, які змінюються при реверсі системи і викликані, наприклад, „перетяжкою” системи.

Якщо кут гістерезису близький до нуля (рис. 6, в), то направляюча майже не має перпендикулярного зміщення інструменту і ним можна знехтувати при роботі з клітиною, адже він не принесе пошкоджень біологічному об'єкту.

**Висновок.** Для визначення точності лінійних направляючих з п'єзоелектричним двигуном запропонована методика вимірювання лінійних переміщень вздовж осі ходу направляючої і розроблено вимірювальний комплекс на основі мікроскопа з телевізійною камерою з використанням сучасних засобів обчислювальної техніки з відповідним програмним забезпеченням, що дозволило проводити вимірювання безпосередньо в процесі переміщення.

Як показали експериментальні дослідження, на точність лінійних переміщень впливають такі параметри, як мертвий хід та гістерезис, які викликані наявністю в системі направляючої люфтів, що значно знижує точність її переміщення.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Nanorobot-6AX – Bench Top Robotic Nanopositioning System DTI-Nanotech August 2006.
2. V. Zhelyaskov, M. Broderick, A. Raphaelovitz, B. Davies. "Long Travel Ranges And Accurate Angular Movement Create New Opportunities In Biomedical Manipulation Systems", Ieee Circuits & Devices Magazine, 2006, Nov/Dec, 75–78.
3. NTS Nanodirect Nanopositioning Piezoelectric Linear Stages With Long Travel Distance, Discovery Technology International, LLLP, <http://www.DTI-Nanotech.com>.
4. Automated Piezoelectric Nanopositioning Systems, IEEE Circuits & Devices Magazine, November/December 2006.
5. Пьезомоторизованная линейная нанонаправляющая Sb-01. <http://piezomotor.com.ua/>
6. Бєлова А.В. Контроль точності нанопереміщень // Матеріали 7-ї Міжнародної науково-технічної конференції „Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика”, Київ, 2007.

БЄЛОВА Альона Вікторівна – аспірант Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.

Наукові інтереси:

– нанотехнології;

– метрологія.

E-mail: [lysakalena@ukr.net](mailto:lysakalena@ukr.net)

Подано 05.10.2007